金属学报 ACTA METALLURGICA SINICA

Hi-B 钢二次再结晶退火初期不同取向晶粒的三维形貌表征

徐 洋　鲍思前　赵 刚　黄祥斌　黄儒胜　刘兵兵　宋娜娜

(武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室 武汉 430081)

摘 要 利用定量逐层研磨和计算机辅助重建及可视化技术，并结合电子背散射衍射(EBSD)技术，研究了 Hi-B 钢二次再结晶退火初期不同取向晶粒的三维形貌。研究表明，Goss 取向晶粒主要呈现出“塔状”，黄铜取向晶粒则类似“上大下小”倒锥状，{411}<148>取向晶粒也表现为“塔状”和倒锥状。而{111}<112>取向晶粒形貌各异，没有一致性. 与其它取向晶粒相比，Goss 取向晶粒在三维尺度上没有尺寸优势，Goss 取向晶粒异常长大前，其长大主要受曲率控制。

关键词 Hi-B 钢, Goss 取向晶粒, 二次再结晶, 三维形貌, EBSD

中图分类号 TG142.77　　**文章编号** 0412-1961(2017)×-××-×

Three-Dimensional Morphologies of Different Oriented Grains in Hi-B Steel Formed During Early Stage of Secondary Recrystallization Annealing

XU Yang, BAO Siqian, ZHAO Gang, HUANG Xiangbin, HUANG Rusheng, Liu Bingbing, SONG Nana

State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081,China

Correspondent: BAO Siqian, associate professor, Tel: 13971419311, E-mail: baosiqian@163.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51274155)

Manuscript received 2016-11-07, in revised form 2016-12-28

ABSTRACT Microstructure and texture evolution of Hi-B steel have been extensively studied in the past decades, and the microstructural features are ordinarily characterized only using a single two-dimensional plane of polished or thin foil specimen. Much information on the morphologies is lost owing to the fact that a large part of microstructure is embedded beneath the polished surface, or removed during specimen preparation. Recently, computer-aided three-dimensional morphologies have been developed that can visualize microstructure in metals. The three- dimensional visualization leads to a better understanding of the actual information of polycrystalline materials, especially when the grain morphologies, size were required in three dimensions. In this paper, three-dimensional morphologies of different oriented grains which include Goss, Brass, {411}<148> and {111}<112> oriented grains in Hi-B steel formed during early stage of secondary recrystallization annealing were investigated by a combination of serial sectioning, computer-aided reconstruction and visualization, and electron back-scattered diffraction technique. By analyzing the three-dimensional morphologies of Goss oriented grain, then discussed the growth behavior of Goss oriented grains before abnormal growth. The results show that Goss oriented grains mainly exhibit pagoda shape, brass oriented grains are similar to inverted taper shape, which the grain sizes reduce gradually from the surface of the sample to the internal along normal direction, and {411}<148> oriented grains also exhibit pagoda shape and inverted taper shape. However, the morphologies of {111}<112> oriented grains show irregular shape. Compared with other oriented grains, Goss oriented grains have no size advantages on three-dimensional scale, and the growth of Goss oriented grains is mainly controlled by curvature before they grow up abnormally.

KEY WORDS Hi-B Steel, Goss oriented grain, secondary recrystallization, three-dimensional morphologies, EBSD

资助项目 国家自然科学基金 No.51274155
收稿日期 2016-11-07 **定稿日期** 2016-12-28
作者简介 徐 洋，男，1991 年生，硕士
通讯作者 鲍思前，baosiqian@163.com，主要从事钢铁材料组织性能控制及新钢种开发
DOI 10.11900/0412.1961.2016.00494

冷轧取向硅钢是具有 Goss 织构({110}<001>)的 Fe-Si 合金，锋锐的 Goss 织构有利于获得优异的磁性能[1~3]。众所周知，这种锋锐的 Goss 织构是在高温退火过程中通过二次再结晶实现的，关于取向硅钢二次再结晶机理主要有 4 种理论：尺寸优势理论[4]、重位点阵(CSL)晶界理论[5,6]、高能(HE)晶界理论[7~9]及固态润湿理论[10]。其中 CSL 晶界理论和 HE 晶界理论目前争论较多，CSL 晶界理论认为 Goss 取向晶粒在初次再结晶阶段更有可能形成低∑CSL 晶界，这些低∑CSL 晶界尤其是∑9 晶界具有更高的迁移率，有利于 Goss 取向晶粒的异常长大；而 HE 晶界理论坚持取向差角在 20°~40°之间的晶界能量高、晶界扩散率高，从而促进抑制剂快速粗化及 Goss 取向晶粒优先长大。

在取向硅钢二次再结晶退火过程中涉及到不同取向晶粒的组织和织构演变，长久以来科研工作者们仅仅利用二维图像来观察分析材料的显微组织，由于组织很多或部分埋在截面底下或者在制样过程中已经磨掉，因此二维图像已丧失了很多组织信息，并不能完全准确地表征显微组织形貌。近年来，吴开明等[11-12]采用了定量逐层研磨和计算机辅助重构技术对Fe-0.28C-3.0Mo(质量分数，%)合金中TTT曲线鼻尖温度以下退化铁素体的三维形貌进行了研究，观察和分析表明，退化铁素体最初在奥氏体晶界形成，然后不是向晶界扩展，而是长向晶内。栾军华等[13]利用系列截面法制备并观测了纯铁晶粒的400张二维金相图片，再利用计算机构建了三维数字可视化模型，该类晶粒模型可供在三维空间从任意角度随意观察，可定量反映单个晶粒尺寸、形状及拓扑特征等几何形态信息，并可给出各晶粒及其晶界在三维多晶体空间中的真实取向信息。本工作利用定量逐层研磨和计算机辅助重建及可视化技术，并结合EBSD技术观察分析高磁感取向硅钢(Hi-B钢)二次再结晶退火初期主要取向晶粒的三维形态，考察Hi-B钢各主要取向晶粒尤其是Goss取向晶粒在三维尺度上是否具有尺寸优势，并探讨它们的形成过程和长大机制。

1 实验方法

在实验室模拟薄板坯连铸连轧(CSP)工艺试制 Hi-B 钢，其化学成分(质量分数，%)为：C 0.05、Si 3.47、Al 0.027、N 0.006、Cu 0.035、Mn 0.096、Sn 0.048，Fe 余量。实验用钢在 25 kg 真空感应电炉冶炼，钢水浇铸到 200 mm×85 mm×40 mm 的氧化铝耐火铸模中，将铸坯以 980 ℃入炉，加热到 1200 ℃，保温 0.5 h 后热轧至 2.5 mm，后经两段式常化处理，一次冷轧至 0.3 mm，对冷轧样品进行脱碳退火和渗氮退火，最后进行 1200 ℃高温退火，气氛为 75%H_2+25%N_2。在高温退火升温阶段采用中断法研究 Goss 取向晶粒异常长大行为，升温速率为 20 ℃/h，从 1000~1150 ℃每隔 10 ℃从炉中取样。为了确定二次再结晶的起始温度，对不同温度下的样品用热盐酸酸洗后进行宏观组织观察，结果表明 1030 ℃之前晶粒没有发生明显的异常长大。

在制备二维系列截面前，借助配有 HKL Channel 5 EBSD 系统的 Nova 400 Nano 场发射扫描电子显微镜先对未发生异常长大的样品轧面(RD-TD)进行织构分析，再沿垂直于轧面方向(ND)定量逐层研磨，设定自动磨、抛时间、压力、速度恒定，因此每磨、抛一次得到的厚度基本相同。本实验中每层磨去的厚度约为 1.9 μm，自动磨、抛之后用体积分数为4%的硝酸酒精进行腐蚀，然后用 Vickers 显微硬度计在试样的目标区域附近至少打下 3 个压痕(载荷 0.98 N)，印痕中心用于相邻两张图像堆垛，如图 1 所示。堆垛的工作由 ScnImage 软件完成，然后用 PhotoShop 进行目标标记和 RGB 格式转换，最终由 ImgToVolume 导出三维信息文件，从而可以得到如图 2 中等效长方体晶粒的几何尺寸。

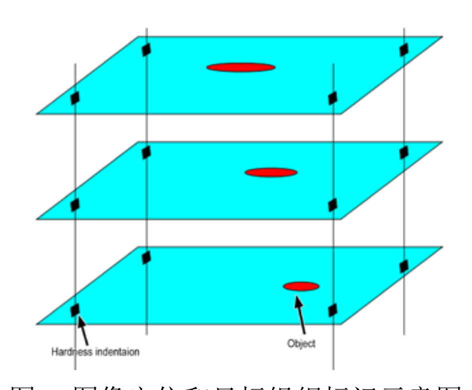


图 1 图像定位和目标组织标记示意图

Fig.1 Schematic of the alignment of images and marking of object crystals

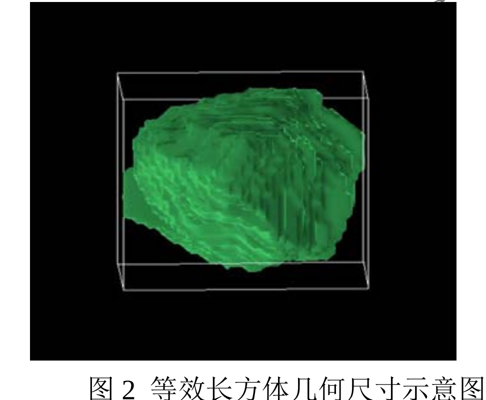


图 2 等效长方体几何尺寸示意图

Fig.2 Schematic of geometric dimensions of equivalent cuboid

2 实验结果与分析

2.1 Goss 取向晶粒三维形貌

图3是研磨之前二次再结晶退火初期不同中断退火温度时样品轧面的EBSD取向图(各取向最大偏差角为15°)。为了得到箭头指示的Goss、黄铜、{111}<112>和{411}<148>取向晶粒的三维形貌，对其进行逐层研磨，从而获取大量的二维金相图片。图4是8个Goss取向晶粒(分别记为G1~G8，见图3)的三维形貌。由图可见，Goss取向晶粒三维形貌较规则，除G1晶粒(图4a)形貌类似于倒锥状外，其余基本上形似“塔状”。

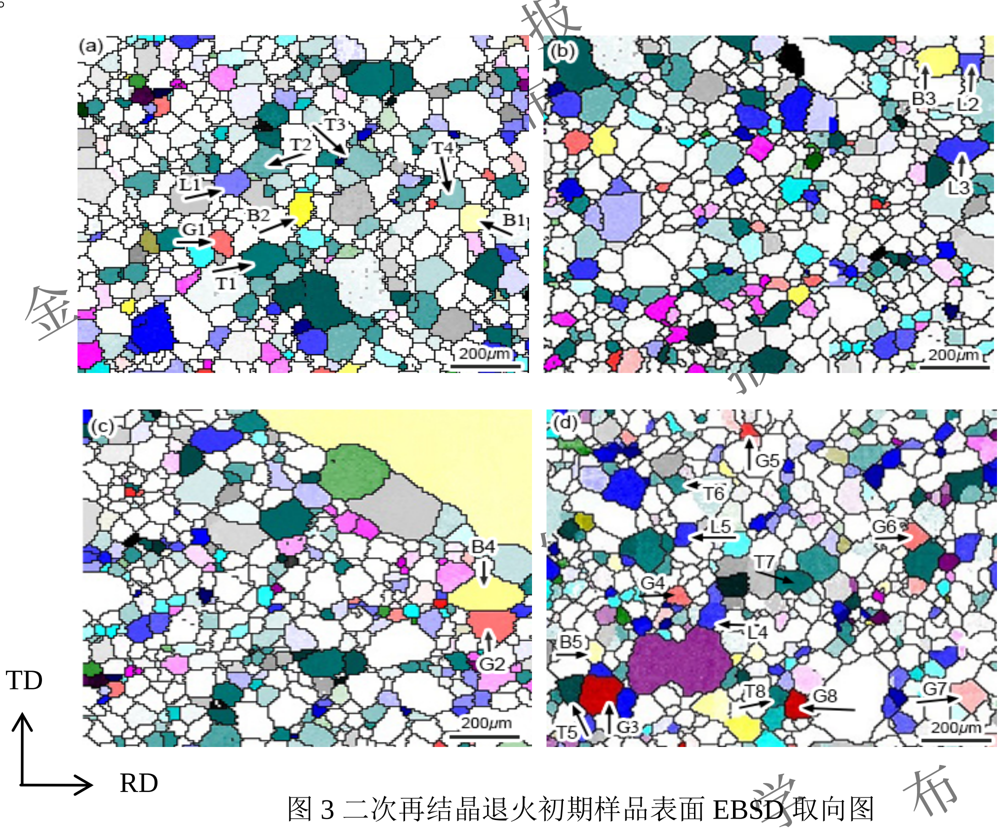
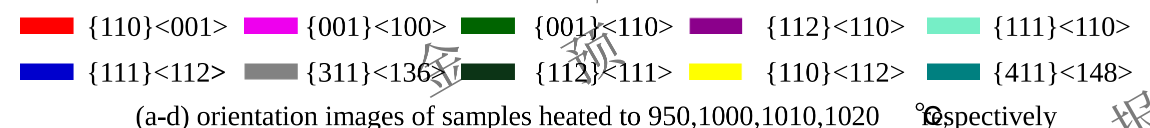


图3 二次再结晶退火初期样品表面EBSD取向图

Fig.3 EBSD orientation images of different oriented grain formed during early stage of secondary recrystallization annealing (RD-rolling direction, TD-transverse direction)



(a-d) orientation images of samples heated to 950,1000,1010,1020 ℃, respectively

G1-G8 represent 8 Goss oriented grains, respectively

B1-B5 represent 5 Brass oriented grains, respectively

L1-L5 represent 5 {111}<112> oriented grains, respectively

T1-T8 represent 8 {411}<148> oriented grains, respectively

图4b中的G2晶粒呈现出不规则的塔状，上宽下尖，整个晶粒磨去了69层，沿ND方向尺寸大约为131 μm。从图3c中可以看到G2晶粒周围有1个大的黄铜取向晶粒和1个{111}<112>取向晶粒，但并没有吞噬{111}<112>取向晶粒发生异常长大，结合二维系列金相和三维形貌分析，这可能是因为：G2 晶粒是五边形，晶界间的夹角小于120°，为了保持平衡晶界会向外凸[14,15]，但G2和B4晶粒之间的晶界是向B4晶粒内凹，此时曲率中心指向B4晶粒，晶界逐渐向B4晶粒迁移直至出现平直的晶界，而周围具有外凸的晶界在曲率的作用下使得G2晶粒开始缩小，最后消失，这和图4b所呈现的三维形貌图是一致的。

图4c中G3晶粒呈现较规则的“塔状”，为了对比晶粒前后的变化情况，给出了G3晶粒在不同层数的微观形貌，如图5（箭头指示位置）所示。整个晶粒研磨了73层，沿ND方向尺寸大约是137.7 μm。结合EBSD分析可知(图3d)，G3晶粒周围有3个{111}<112>取向和2个{411}<148>取向晶粒，其它为非常见取向晶粒。从晶界迁移驱动力观点分析，图3d中的G3晶粒形似七边形(边数>6)，根据Shvindlerman定义式

和晶界稳定条件[16,17]可知，七边形晶粒具有内凹的晶界，由于曲率驱动作用，晶粒应该是不断长大；另一方面从 CSL 晶界理论上分析，因为{111}<112>取向晶粒、{411}<148>取向晶粒都与 Goss 取向晶粒具有特殊的∑9 高迁移率晶界[18]，也应是有利于 Goss 取向晶粒的异常长大。然而从图 4c 中可以看到 G3 晶粒并没有发生异常长大，推测可能的原因是在二次再结晶初期，析出的细小抑制剂粒子能够完全钉扎住所有取向晶粒的晶界迁移，但如果温度进一步升高，抑制剂粒子将会熟化与分解，再加上 CSL 晶界相对于普通晶界纯净度比较高，能量比较低，抑制剂在此类晶界不易析出，可能有助于 G3 晶粒成为二次晶核优先长大。

G6、G8 晶粒周围环境与 G3 晶粒相似，它们都与{411}<148>取向晶粒相邻，而且{411}<148>取向晶粒与 Goss 取向晶粒呈∑9 晶界关系，但从三维形貌上观察这 2 个 Goss 取向晶粒没有发生异常长大。根据系列二维金相和 EBSD 取向图分析，推断它们没有发生长大的主要原因可能是与曲率有关，G6 和 G8 晶粒都有内凹的晶界，在曲率驱动作用下晶粒慢慢缩小。从以上分析表明，Goss 取向晶粒异常长大开始之前，晶界的迁移主要还是受曲率控制。

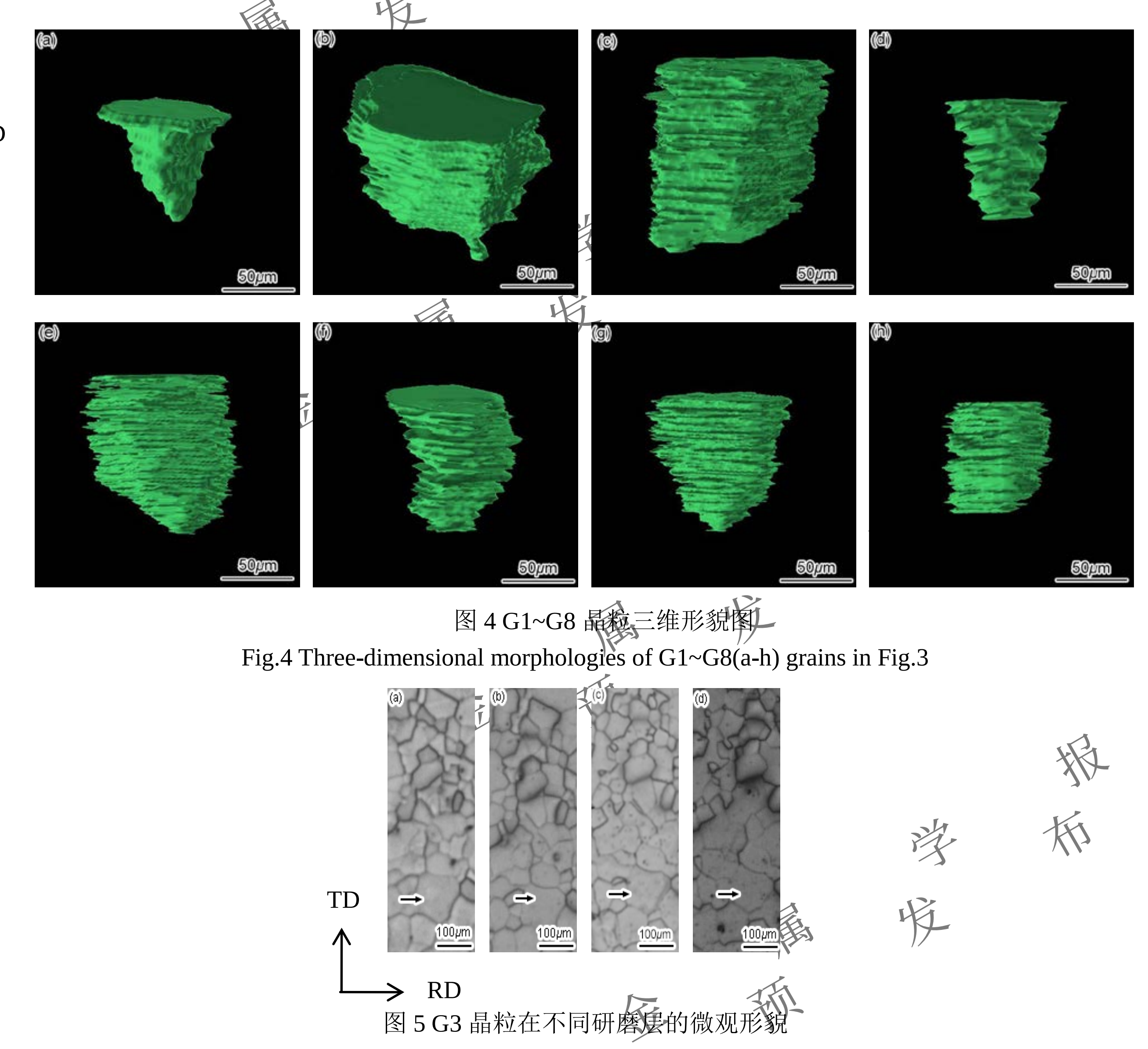


图 4 G1~G8 晶粒三维形貌图

Fig.4 Three-dimensional morphologies of G1~G8(a-h) grains in Fig.3

图 5 G3 晶粒在不同研磨层的微观形貌

Fig.5 Morphologies of G3 grain polished to 15 (a), 23 (b), 31 (c), 39 (d) layers, respectively

(The arrows indicate G3 grain in different layers)

表 1 给出了 8 个 Goss 取向晶粒的等效长方体几何尺寸。由表可知，8 个 Goss 取向晶粒中 G2 晶粒三维尺寸最大，且其三维尺寸最大不超过 200 μm，G4 晶粒三维尺寸相对较小，大约 70 μm 左右；另外，8 个 Goss 取向晶粒三维尺寸差异性不很明显。

表 1 G1~G8 晶粒等效长方体几何尺寸

Table1 Geometric dimensions of equivalent cuboid of G1~G8 grains in Fig.3

Grain No.	*L* (RD) / μm	*W* (TD) / μm	*H* (ND) / μm	*L*:*W*:*H*
G1	102.6	102.89	93.96	1:1:0.92
G2	195.46	170.28	131.1	1:0.87:0.67
G3	142.38	160.4	137.7	1:1.13:0.97
G4	87.5	60.56	84.01	1:0.69:0.96
G5	114.95	130.5	111.3	1:1.14:0.97
G6	90.87	85.52	91.13	1:0.94:1
G7	103.66	119.92	91.35	1:1.16:0.88
G8	74.8	72.6	70.02	1:0.97:0.94

Note: *L*–length, *W*- width, *H*- height

2.2 其他典型取向晶粒三维形貌

2.2.1 黄铜取向晶粒三维形貌

二次再结晶过程中 Goss 取向晶粒和黄铜取向晶粒都会和{111}<112>取向晶粒形成具有高迁移率的 CSL 晶界，黄铜取向晶粒的{110}面也平行于轧面，在 H_2 气氛下轧面是低能表面，能与 Goss 取向晶粒竞争长大的主要是黄铜取向晶粒[19-20]。

图 6 是 5 个黄铜取向晶粒(分别记为B1~B5，见图 3)三维形貌图。由图可见，黄铜取向晶粒形似“上大下小”倒锥状。由图 3c 可知， B4 晶粒是被 Goss、{111}<112>、{001}<100>、{311}<136>(近似{411}<148>取向)和{411}<148>等取向晶粒包围。图 7 为 B4 晶粒在不同研磨层的二维形貌，B4 晶粒在三维形貌上类似倒锥状，共有 33 层组成，在 ND 方向上约为 64 μm。处在 B4 晶粒正下方的 G2 晶界在曲率作用下开始向其迁移，致使 B4 晶粒沿 TD 有收缩迹象。同时 G2 晶界逐渐向左迁移，最终合并了 B4 晶粒左边的小 Goss 取向晶粒，形成了一个稍大的 Goss 取向晶粒(见图 7 中的 G2)。而位于B4 晶粒左上角的{001}<100>取向晶粒，根据系列二维金相分析可知，它并没有向 B4 晶粒发生迁移，这可能是由于初次再结晶获得的 γ 织构不利于立方晶粒的生长[21,22]。

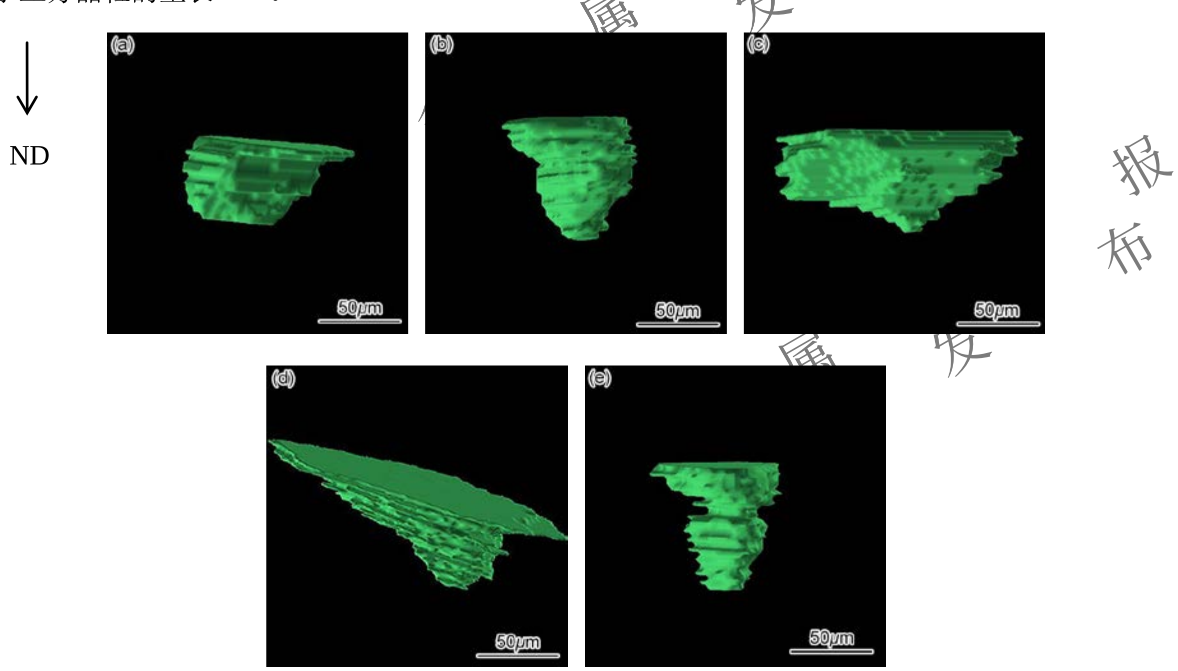


图 6 B1~B5 晶粒三维形貌图

Fig.6 Three-dimensional morphologies of B1~B5(a-e) grains in Fig.3

表 2 给出了 5 个黄铜取向晶粒的等效长方体几何尺寸。由表可知，5 个黄铜取向晶粒中 B4 晶粒三维尺寸最大，且其三维尺寸最大不超过 220 μm，B2 晶粒和 B5 晶粒三维尺寸相对较小，大约 70 μm 左右；另外，与 RD 方向和 ND 方向相比较，黄铜取向晶粒 ND 方向尺寸相对较小，这可能是在 H_2 气氛下{110}面是低能表面，黄铜取向晶粒优先沿 RD 方向和 TD 方向长大。

表 2 B1~B5 晶粒等效长方体几何尺寸

Table 2 Geometric dimensions of equivalent cuboid of B1~B5 grains in Fig.3

Grain No.	*L* (RD) / μm	*W* (TD) / μm	*H* (ND) / μm	*L*:*W*:*H*
B1	102.77	86.6	51.23	1:0.84:0.5
B2	76.83	68.13	77.3	1:0.89:1
B3	154.94	113.41	65.36	1:0.73:0.42
B4	215.78	110.36	64	1:0.51:0.3
B5	71.03	66.62	77.3	1:0.94:1.08

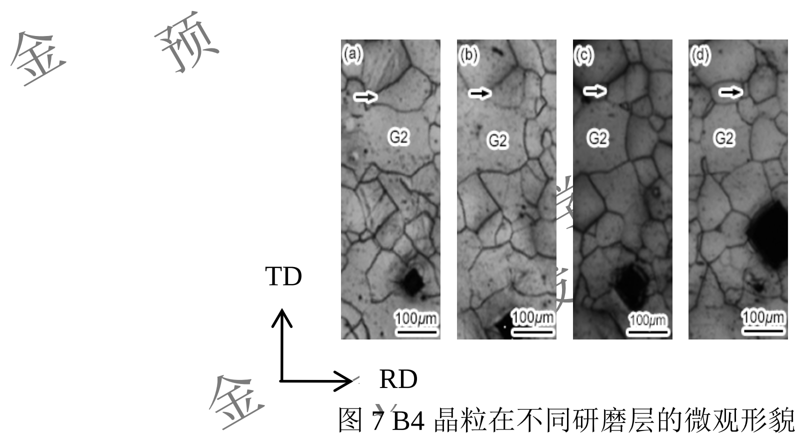


图 7 B4 晶粒在不同研磨层的微观形貌

Fig.7 Morphologies of B4 grain polished to 8 (a), 16 (b), 24 (c), 32 (d) layers, respectively (the arrows indicate B4 grain in different layers; "G2" indicates big {110}<001> oriented grain below the B2 grain)

2. 2. 2 {111}<112>取向晶粒三维形貌

二次再结晶之前{111}<112>取向晶粒大量存在对形成锋锐的 Goss 织构很关键[23~25]，因此分析{111}<112>取向晶粒的三维形貌有助于理解 Goss 取向晶粒长大机理，以及周围环境对其有何影响。

图 8 是 5 个{111}<112>晶粒三维形貌图(分别记为 L1~L5，见图 3)。由图可见，除了 L4 晶粒形似"塔状"外，其它晶粒形貌不规则，没有一致性。图 9 为 L4 晶粒（箭头指示的晶粒）在不同研磨层的微观形貌，总共研磨了 72 层。结合图 3 分析可知，L4 晶粒下面有 1 个大的{112}<110>取向晶粒（见图 9 中的编号 1），形似"哑铃"状，在向下研磨过程中，处在 L4 晶粒左下角的小晶粒（见图 9 中的编号 2）逐渐将其和{112}<110>晶粒分开，并向 L4 晶粒生长，使 L4 晶粒在 TD 方向受到压挤，表现为扁平状，而周边其他晶粒对它没有影响，在第 54 层时 L4 晶粒上边角位置有新晶粒出现(图 9d 中的编号 3)，逐渐向 L4 晶粒生长，这可能是{111}<112>取向在角隅及组织不均区等位置因存在大的取向梯度而发生不连续再结晶所致[26]，随后磨到第 117 层时在其内部也开始有新晶粒出现并最终吞噬了 L4 晶粒。

表 3 给出了 5 个{111}<112>取向晶粒的等效长方体几何尺寸。由表可知，这 5 个晶粒中 L3 晶粒三维尺寸最大，且其三维尺寸最大不超过 210 μm，L5 晶粒三维尺寸相对较小，大约 70 μm 左右；另外，5 个{111}<112>取向晶粒三维尺寸差异性不很明显。

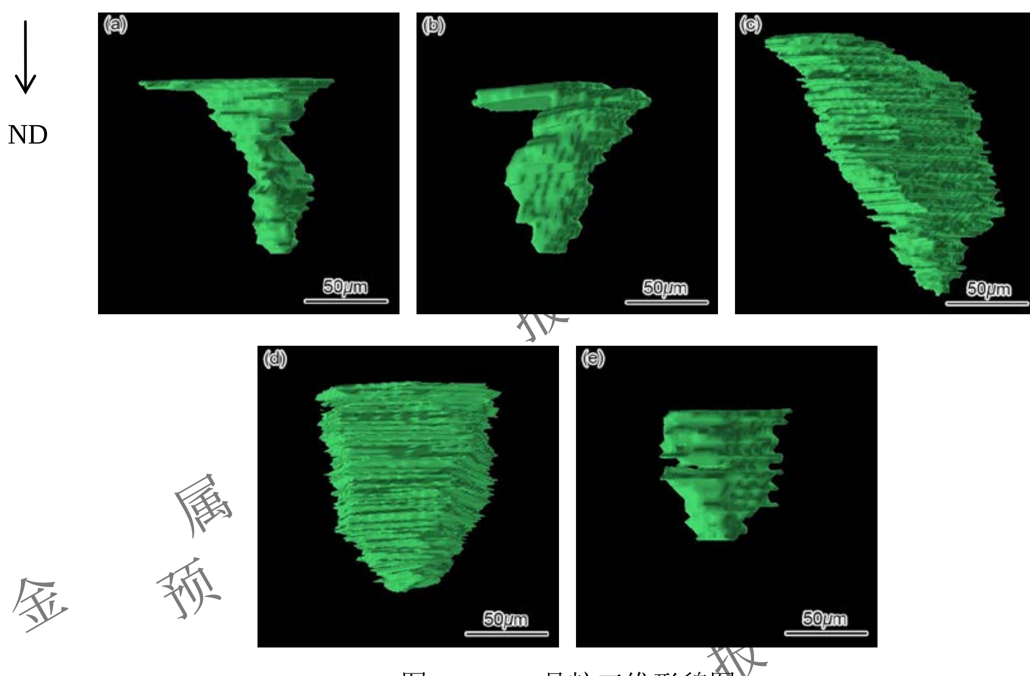


图 8 L1~L5 晶粒三维形貌图

Fig.8 Three-dimensional morphologies of L1~L5 (a-e) grains in Fig.3

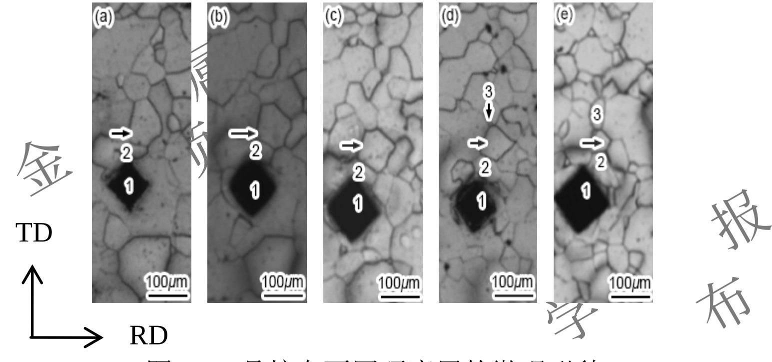


图 9 L4 晶粒在不同研磨层的微观形貌

Fig.9 Morphologies of L4 grain polished to different layers

(a-e) morphologies of L4 grain at 18 (a), 30 (b), 42 (c), 54 (d), 66 (e) layers, respectively

(the arrows indicate L4 grains in different layers; "1" indicates big {112}<110> oriented grain below L4 grain; "2" indicates small grain at the bottom left corner of L4 grain; "3" indicates emerging grain at the corner of L4 grain)

表 3 L1~L5 晶粒等效长方体几何尺寸

Table3 Geometric dimensions of equivalent cuboid of L1~L5 grains in Fig.3

Grain No.	*L* (RD) / μm	*W* (TD) / μm	*H* (ND) / μm	*L*:*W*:*H*
L1	121.66	128.66	110.77	1:1.06:0.91
L2	102.19	129.06	108.79	1:1.26:1.06
L3	166.95	209.4	163.4	1:1.25:0.98
L4	108.99	114.76	137.55	1:1.05:1.26
L5	79.73	66.32	78.1	1:0.83:0.98

2.2.3 {411}<148>取向晶粒三维形貌

由上文可知{411}<148>取向晶粒和{111}<112>取向晶粒均与 Goss 取向晶粒呈∑9 关系，关于其在二次再结晶退火时是否有利于 Goss 取向晶粒长大研究较少，文献[27]报道关于异常长大 Goss 取向晶粒内部

{411}<148>岛晶的形成，但缺乏直接证据证明{411}<148>织构对 Goss 取向晶粒长大的影响，图 10 是 8 个{411}<148>取向晶粒的三维形貌(分别记为 T1~T8，见图 3)。由图可见，{411}<148>取向晶粒形貌较规则，T1、T3 和 T5 三个晶粒形貌类似于倒锥状，其它晶粒形貌类似于“塔状”。表 4 给出了 8 个{111}<112>取向晶粒的等效长方体几何尺寸，由表可知，这 8 个晶粒的三维尺寸中除少数几个晶粒在 ND 方向尺寸有波动外，整体三维尺寸相差不大。

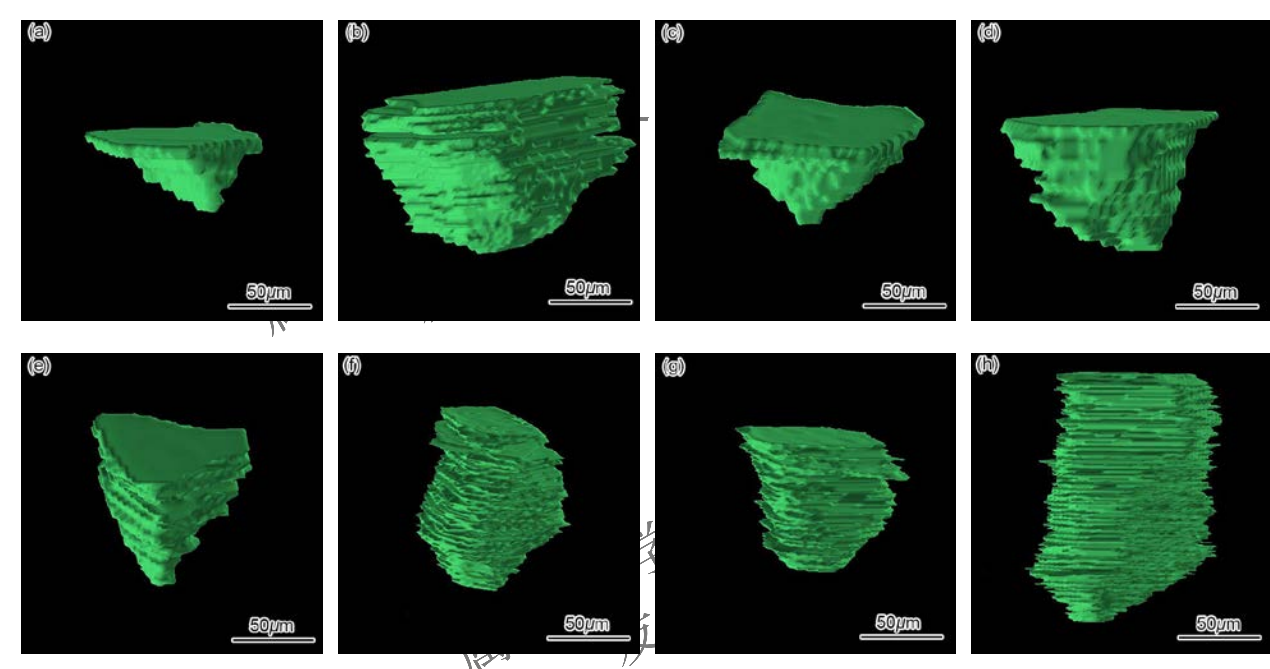


图 10 T1~T8 晶粒三维形貌图

Fig.10 Three-dimensional morphologies of T1~T8(a-h) grains in Fig.3

表 4 T1~T8 晶粒等效长方体几何尺寸

Table 4 Geometric dimensions of equivalent cuboid of T1~T8 grains in Fig.3

Grain No.	*L* (RD) / μm	*W* (TD) / μm	*H* (ND) / μm	*L*:*W*:*H*
T1	105.82	97.3	44.6	1:0.92:0.42
T2	174.79	128.21	105.93	1:0.73:0.61
T3	130.89	108.47	70.65	1:0.83:0.54
T4	117.18	103.08	79.97	1:0.88:0.68
T5	92.49	90.13	93.1	1:0.97:1
T6	109.33	105.44	105.72	1:0.96:0.96
T7	101.18	110.19	80.5	1:1.09:0.8
T8	118.9	122.84	156.5	1:1.03:1.32

3　结论

(1) Hi-B 钢二次再结晶退火初期 Goss 取向晶粒主要呈现出“塔状”，黄铜取向晶粒则类似“上大下小”倒锥状，{411}<148>晶粒也表现为“塔状”和倒锥状，而{111}<112>取向晶粒形貌各异，没有一致性。

(2) Goss 取向晶粒相比其它取向晶粒在三维尺度上没有尺寸优势，Goss 取向晶粒异常长大前，其长大主要受曲率控制。

参考文献

[1] Goss N P. Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test [P]. US Pat, 19655539, 1934

[2] Littmann M F, Heek J E. Process of increasing the permeability of oriented silicon steels [P]. US Pat, 2599340, 1952
[3] Littmann M F. Structures and magnetic properties of grain-oriented 3.2% silicon-iron [J]. J. Appl. Phy, 1967, 1104: 1108
[4] Hillert M. On the theory of normal and abnormal grain growth [J]. Acta. Metall., 1965, 227: 238
[5] Harase J, Shimizu R. Distribution of {100}<001> oriented grains in the primary recrystallized 3%Si-Fe alloy [J]. Trans. Jpn. Inst. Met., 1988, 388: 398
[6] Shimizu R, Harase J. Coincidence grain boundary and texture evolution in Fe-3%Si [J]. Acta. Metall., 1989, 1241: 1249
[7] Hayakawa Y, Szpunar J A, Palumbo G, et al. The role of grain boundary character distribution in Goss texture development in electrical steels [J]. J. Magn. Mag. Mater., 1996, 143: 144
[8] Rajmohan N, Szpunar J A. An analytical method for characterizing grain boundaries around growing goss grains during secondary recrystallization [J]. Scripta Mater., 2001, 2387: 2392
[9] Hayakawa Y, Kurosawa M. Orientation relationship between primary and secondary recrystallized texture in electrical steel [J]. Acta Mater., 2002, 4527: 4534
[10] Park H,Kim D Y, Hwang N M. Microstructural evidence of abnormal graingrowth by solid-state wetting in Fe-3%Si steel [J]. J. Appl. Phy., 2004, 5515: 5521
[11] Wu KM, Enomoto M. Three-dimensional analysis of degenerate ferrite in an Fe-C-Mo alloy [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2004, 134: 139
(吴开明, M.Enomoto. Fe-C-Mo 合金中退化铁素体的三维分析 [J]. 中国体视学与图像分析, 2004, 134: 139)
[12] Wu KM. 3-D morphology observation of degenerate ferrite in steel Fe-0.28C-3.0Mo using serial sectioning and computer-aided reconstruction [J]. Acta. Metall. Sin., 2005, 1237: 1242
(吴开明. 连续截面和计算机辅助重建法观察 Fe-0.28C-3.0Mo 合金钢退化铁素体的三维形貌 [J]. 金属学报, 2005, 1237: 1242)
[13] Luan J H, Liu G Q,Wang G H. Three-dimensional reconstruction of grains in pure iron specimen [J]. Acta. Metall. Sin., 2011, 69: 73
(栾军华, 刘国权, 王浩. 纯 Fe 试样中晶粒的三维可视化重建[J]. 金属学报, 2011, 69: 73)
[14] Zhang Q. Curvature-driven grain growth by cellular automaton simulation in isothermal process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012
(张 倩. 等温过程曲率驱动下晶粒长大的元胞自动机模拟 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012)
[15] He Z Z, Zhao Y. Electrical steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 102
(何忠治, 赵宇, 罗海文. 电工钢 [M]. 冶金工业出版社, 2012: 102)
[16] Gottstein G, Molodov D A, Shvindlerman L S. Grain Boundary Migration in Metals: Recent Developments [J]. Interface Science, 1998, 7: 22
[17] Burke J E, Turnbull D. Recrystallization and grain growth [J]. Progress in Metal Physics, 1952, 220: 292
[18] Lin P, Palumbo G, Harase J, et al. Coincidence site lattice (csl) grain boundaries and goss texture development in Fe-3% Si alloy [J]. Acta Mater., 1996, 4677: 4683
[19] Takamiya T, Kurosawa M, Komatsubara M. Effect of hydrogen content in the final annealing atmosphere on secondary recrystallization of grain-oriented Si steel [J]. J. Magn. Magn. Mater., 2003, 254: 255
[20] Mengqi, Qian, Ping, et al. Analysis of micro-texture during secondary recrystallization in a Hi-B electrical steel[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2011, 1065: 1071
[21] Wang H, Luo L J, Wang J A. Formation and growth of cubic grains during rolling-annealing process in Fe-3.2%Si alloy [J]. T. Mater. Heat. Treat., 2012, 70: 75
(王辉, 骆靓鉴, 王均安. 铁硅合金轧制-退火过程中立方取向晶粒的形核与长大 [J]. 材料热处理学报, 2012, 70: 75)
[22] Zhou B X. Issues concerning the formation of cube texture of silicon-iron alloy [J]. Baosteel Technol., 2000, 52: 58

(周邦新. 铁硅合金中形成立方织构的有关问题 [J]. 宝钢技术, 2000, 52: 58)

[23] Hyung-Ki P, Chang-Soo P, Tae-Wook N A, et al. Irregular or smooth grain boundaries evolved after secondary recyrstallization of Fe-3%Si steel [J]. Mater. Trans. JIM., 2012, 658: 661

[24] Park J Y, Szpunar J A. Influence of the primary recrystallization texture on abnormal grain growth of Goss grains in grain oriented electrical steels [C]. Mater. Sci. Forum., 2002, 821: 826

[25] Nakashima S, Takashima K, Harase J. Effect of silicon content on secondary recrystallization in grain-oriented electrical steel produced by single-stage cold rolling process [J]. ISIJ. Int., 1991, 1007: 1012

[26]Jiang S H, Mao W M, Yang P, Ye F. Recrystallization behavior of warm rolled Fe-6.5%Si alloy sheet [J]. J. Univ. Sci. Technol. B., 2014, 1643: 1649

(蒋虽合, 毛卫民, 杨平,等. Fe-6.5%Si 合金温轧后退火过程中再结晶行为 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 1643: 1649)

[27] Liu Z Q, Yang P, Mao W M, et al. Effect of {114}<418> texture on abnormal growth during secondary recrystallization in grain-oriented steel [J]. Acta. Metall. Sin., 2015, 769: 776

(刘志桥, 杨平, 毛卫民,等. 取向硅钢中{114}<418>织构对二次再结晶时晶粒异常长大的影响 [J]. 金属学报, 2015, 769: 776)

